ChinaXiv合作期刊

第46卷 第8期
2023年8月

核 技 术 NUCLEAR TECHNIQUES
www.hjs.sinap.ac.cn

Vol.46，No.8
August 2023

超新星及其蕴含的科学秘密

李志宏[1,2] 李歌星[1] 王韩奎[3] 李云居[1] 宋 娜[1] 陈 晨[1]
田竣文[1] 董 超[1] 李家英豪[1]

1（中国原子能科学研究院 北京 102413）
2（中国科学院大学 北京 101408）
3（浙江理工大学 杭州 310018）

摘要 超新星是人们能看到的宇宙中最为绚丽的烟花，其爆发时释放的能量约为太阳光度的100亿倍，可以帮助科学家们看得更远。Ia超新星作为标准烛光，人们可以借助它来测量宇宙中星系间的距离。超新星爆炸也会把产生的大量重元素抛射到星际空间，成为星系化学演化的主要驱动力。此外，超新星还对银河系元素的起源、太阳系结构形成和地球生命演化至关重要。对超新星的研究有助于丰富人们对宇宙的认识，帮助我们破解宇宙膨胀、重元素产生和生命起源之谜。当前，科学家们预测下一个超新星将随时爆发，研究人员正为观测即将爆发的超新星做充分准备。

关键词 超新星，标准烛光，元素起源，生命起源

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080021

关联视频DOI: 10.12351/ks.2208.0927



Supernovae and their scientific secrets

LI Zhihong[1,2] LI Gexing[1] WANG Hankui[3] LI Yunju[1] SONG Na[1] CHEN Chen[1]
TIAN Junwen[1] DONG Chao[1] LI Jiayinghao[1]

1(*China Institute of Atomic Energy*, *Beijing 102413*, *China*)
2(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing 101408*, *China*)
3(*Zhejiang SCI-TECH University*, *Hangzhou 310018*, *China*)

Abstract Supernovae are the most gorgeous fireworks that people can observe in the universe. Their explosion can produce a maximum luminosity 10 billion times that of the Sun, helping scientists see farther. Type Ia supernovae can be used as a standard candle to facilitate measurement of the distance between galaxies in the universe. A supernova explosion will also propel a large number of heavy elements into interstellar space, which is a major driving force for the chemical evolution of galaxies. In addition, supernovae are crucial to the origin of elements in the Milky Way, the formation of the structure of the solar system, and the evolution of life on the Earth. The study of supernovae will further enrich our understanding of the universe and help us solve the mysteries of the expansion of the universe, the generation of heavy elements, and the origin of life. At present, scientists predict that the next supernova will explode at any time, and preparations are in progress for observing the coming supernova.

Key words Supernova, Standard candle, Origin of elements, Origin of life

国家自然科学基金(No.U2267205, No.12275361)和财政部稳定支持项目(No.WDJC-2019-13)资助

第一作者：李志宏，男，1968年出生，2002年于中国原子能科学研究院获博士学位，研究领域为放射性核束物理与核天体物理，E-mail：zhli@ciae.ac.cn

收稿日期：2022-12-27，修回日期：2023-06-09

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U2267205, No.12275361), the Continuous Basic Scientific Research Project (No.WDJC-2019-13)

First author: LI Zhihong, male, born in 1968, graduated from China Institute of Atomic Energy with a doctoral degree in 2002, focusing on radioactive ion beam physics and nuclear astrophysics, E-mail: zhli@ciae.ac.cn

Received date: 2022-12-27, revised date: 2023-06-09

chinaXiv:202309.00051v1

ChinaXiv合作期刊

超新星是自然界中威力巨大的恒星爆炸事件，其释放的能量可达10^{46} J[1−2]。爆发时恒星的光度会突然增大到原来光度的10^3万倍以上，能够照亮整个星系。在银河系附近出现的超新星能够被位于地球上的人们用肉眼看到。超新星出现的时间长短不一，短的仅有几天，长的可持续数年，就像来去匆匆的过客。因此，我国古代把超新星称作客星或变星。为了预测天气、占卜吉凶，各朝代的司天台对夜空中出现的客星都做下了详细的观测记录，这些记录对研究超新星具有重大的科学价值[3]。表1列出了自古以来人们用肉眼看到的超新星，科学家们也用天文望远镜找到了这些超新星的遗迹，并对它们进行了分类。

表1　人们用肉眼看到的超新星
Table 1　Supernovae seen by the naked eye

超新星编号 Supernova number	位置 Position	与地球的距离 / 光年 Distance from Earth / ly	持续时间 Duration	亮度 Brightness	类型 Type
SN185	南门二附近Alpha Centauri	8 200	20个月20 months	−8	Ia
SN393	天蝎座Scorpio	3 000	8个月8 months	−1	II
SN1006	豺狼星座Lupus	7 200	数年Several years	−10	Ia
SN1054	金牛座Taurus	6 500	22个月22 months	−5	EC
SN1181	仙后座Cassiopeia	8 000	6个月6 months	−1	II
SN1572	仙后座Cassiopeia	8 500	18个月18 months	−4	Ia
SN1604	蛇夫座Ophiuchus	20 000	1年One year	−3	Ia
SN1987a	大麦哲伦星云Large Magellanic Cloud	170 000	几个月Several months	3	II

根据观测光谱的类型可以把超新星分成两大类：I类和II类超新星。如果光谱中没有氢谱线，被称为I类超新星，反之则被称为II类超新星[4]。I类超新星又可分为Ia、Ib和Ic类超新星。Ia类超新星有硅谱线，Ib类超新星没有硅谱线而有氦谱线，Ic类超新星的光谱中既没有硅谱线，也没有氦谱线。II类超新星也可根据光变曲线的形状被分为IIL和IIP类超新星。

Ia超新星是密近双星演化到最后的终极结果[5]。密近双星的初始质量都小于8 $M_\odot$，质量较大的恒星演化较快，经过氢燃烧和氦燃烧过程，变成核心为碳和氧的白矮星。伴星因质量小，演化稍慢，处于红巨星或者主序星阶段。根据超新星的爆发模型，随着演化的进展白矮星会吸积其伴星的物质，并在周围形成一层氢、氦外壳。获得的能量将使白矮星的表面温度升高，发生氢聚变和氦聚变，使得白矮星的核心在接近钱德拉塞卡质量极限（1.4 $M_\odot$）[6]时，达到碳的点火温度并引发超新星爆炸。II类超新星是质量大于8 $M_\odot$的恒星演化到终点的必然结局。大质量的恒星经过氢燃烧、氦燃烧、碳燃烧、氖燃烧、氧燃烧和硅燃烧等一系列核燃烧阶段形成一个铁核心。开始时，铁核心处于电子简并状态。随着核心收缩，引力增大，电子简并压力无法抵抗引力的收缩使得电子被压入铁原子核中，使电子和原子核里的质子结合为中子，形成以中子为主的恒星核心，用于抵抗引力的压力也由电子简并压力转变成中子简并压力。此时，核心的体积将快速收缩10万倍，并释放巨量的引力势能。II类超新星是自然界中最常见的恒星爆炸，约占当今宇宙中所有超新星的一半。有大约1/4的超新星是Ia类超新星，另外1/4的超新星为Ib和Ic类超新星。天文观测发现，Ia超新星具有更高的亮度，并可作为宇宙测距的标准烛光。

超新星中蕴含着许多重大的科学秘密，努力去破解这些秘密可以极大地推动科学进步，并加深人们对宇宙本源的认识。本文将介绍如何利用超新星来研究宇宙年龄和组分、银河系化学演化历史、太阳系的形成以及生命起源之谜。

1　宇宙的年龄与成分

通过对超新星的观测，我们可以获得星系的红移与距离关系，如图1所示。为了定量地解释得到的距离-红移关系，需要建立宇宙演化模型，并用这个模型来说明宇宙的形状、尺寸、组成、特点和演化规律等等[7]。根据弗里德曼宇宙学方程[8]，宇宙膨胀率与物质密度之间的关系可以表示为：

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\left(\rho_m + \rho_r + \rho_\Lambda + \rho_k a^{-2}\right) \tag{1}$$

定义$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$为宇宙的临界密度，$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c}$为物质的宇宙学参数。由此可得到光度距离与宇宙学参数之间的关系：

$$d_L = \frac{1+z}{H_0}\int_0^z \left[\Omega_\Lambda + \Omega_k(1+z')^2 + \Omega_m(1+z')^3 + \Omega_r(1+z')^4\right]^{-1/2} dz' \tag{2}$$

chinaXiv:202309.00051v1

ChinaXiv合作期刊

通过调节宇宙学参数，可以拟合出与天文观测结果相符的距离-红移关系。并进一步获得宇宙的年龄和尺度信息。根据最新的天文观测数据，可以拟合出当前宇宙中暗能量的组分为68.3%，暗物质的量为26.8%，原子物质所占的比例约为4.9%。也可以推导出宇宙的年龄为138亿年，宇宙的半径约为465亿光年。

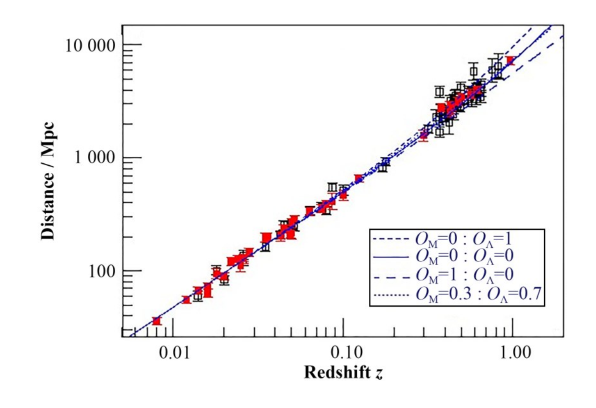


图1 恒星的距离与红移的关系

Fig.1 Relationship between distance and redshift of stars

事实上，存在着很多影响星系间距离与红移关系的因素。比如，Ia超新星的峰值光度会受到寄主星系的形态、质量、年龄、恒星的形成率、宇宙的平均金属丰度等参量的影响。一些物理原因（比如物理常数的变化与否）也会引起一些宇宙学参数的变化，从而导致分析结果有很大的不确定性。前不久，我们分别研究了精细结构常数的变化[9]和宇宙平均金属性[10]对宇宙学参数的影响，揭示了微观和宇观宇宙尺度之间更深层次的物理联系，并导出宇宙正以更快速度膨胀的结论。

2 银河系的化学演化

超新星的爆炸不仅释放巨大的能量，也会向星际空间喷射物质，从而成为驱动星系化学演化的主要动力。大质量恒星的一生中，会经历各个阶段的核燃烧过程，致使重元素的丰度逐渐增加，恒星的平均金属性越来越大。超新星的爆炸将使恒星在演化期间产生的化学元素被喷射到星际空间，导致星际介质的金属性也会越来越大。星际介质也可以进一步形成星云，凝聚成下一代恒星，并进一步演化、循环下去。因此，可以从星际介质或恒星表面物质的金属性追踪星系化学演化的历史过程。

放射性元素具有计时功能[11]，可以用来研究超新星爆炸的频率和银河系化学演化的规律。超新星爆炸时会产生一些纯r-过程的核素，这些核素的数目随时间的变化规律如下[12-13]：

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = -\lambda_i N_i(t) + P_i \Psi(t) \tag{3}$$

式中：$N_i(t)$为t时刻放射性核素i的数目；$\Psi(t)$为单位时间吸收的超新星抛射物质的量或物质的产生速率；P_i为r-过程产生的核素i的丰度，可以通过r-过程的模型计算获得。假设银河系中第一次超新星爆发的时间是零时刻，太阳系刚形成时为τ时刻。则有t=0时，$N_i(0)=0$；$t=\tau$时，$N_i(\tau)$为太阳系原初核素数目。为了获得τ和银河系物质产生率的平均值，我们可以通过绘图法来求解方程(3)。选择4种纯r-过程的核素：^{187}Re、^{232}Th、^{235}U和^{238}U，结果示于图2中。可以看出，除^{232}Th的求解效果不太理想外，^{187}Re、^{235}U和^{238}U的曲线完美地交叉在一点。我们可以因而获得太阳系形成时银河系的年龄为78亿年，此数值加上太阳系的年龄46亿年，表明银河系中首个超新星爆发至今的时间，近似于的银河系的年龄为124亿年[14]。该结果与动力学模拟的大爆炸后星系形成年代是相符的。

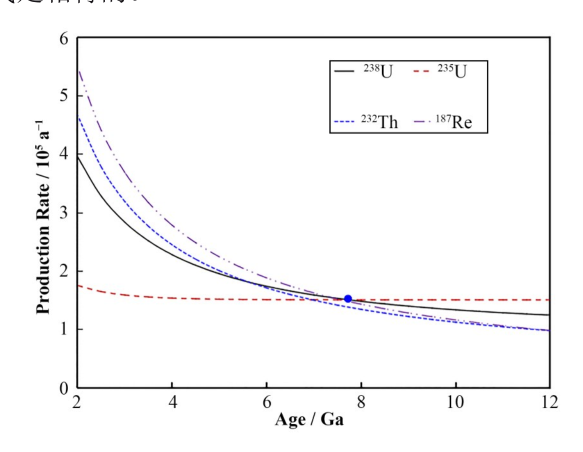


图2 银河系中元素产生率与年龄间的关系

Fig.2 Relationship between element production rate and age in the Milky Way

3 触发太阳系形成的“扳机”和生命的起源之谜

超新星爆炸也可能是太阳系结构形成的触发“扳机”。有一种假说[15]认为，积蓄了数十亿年的太阳系原始星云突然遭遇一次超新星爆炸。超新星抛射的物质被太阳系原始星云吸收，从而导致星云的凝聚和收缩。由于动量守恒的约束，随着星云的收缩，其旋转速度越来越快，形状越来越薄，呈现一个中心略鼓的圆盘形状。星云的中心在引力的收缩下逐渐形成太阳，周围较薄的地方形成太阳系的八大行星。根据动力学模拟，这一形成过程大概持续约200万年。因此，半衰期为几十万年到几百万年的核素可以用来追踪太阳系形成的历史[16]。

chinaXiv:202309.00051v1

ChinaXiv合作期刊

Banerjee等[17]研究了太阳系早期^{10}Be、^{41}Ca、^{107}Pd等几种放射性核素的演化曲线(图3)。他们发现,如果假定这些核素来源于一个低质量的超新星爆发,则可以得到与观测数据一致的同位素含量。Boss和Keiser[18]开发了一种二维模型,这些模型的演化结果显示,太阳系原始陨石中的^{60}Fe可能来自超新星。此外,科学家们也在墨西哥的阿兰德陨石中发现了^{26}Mg同位素的超丰现象[19]。^{26}Mg超丰的原因被认为是太阳系形成时被注入大量的^{26}Al核素。这些^{26}Al核素的衰变导致了^{26}Mg的超丰现象,并可以解释陨石中大量的微小颗粒。研究这些放射性核素的产生机制[20−21],并分析太阳系原初陨石中的放射性核素,可以推理太阳系形成的历史进程,帮助我们解开太阳系的形成之谜。

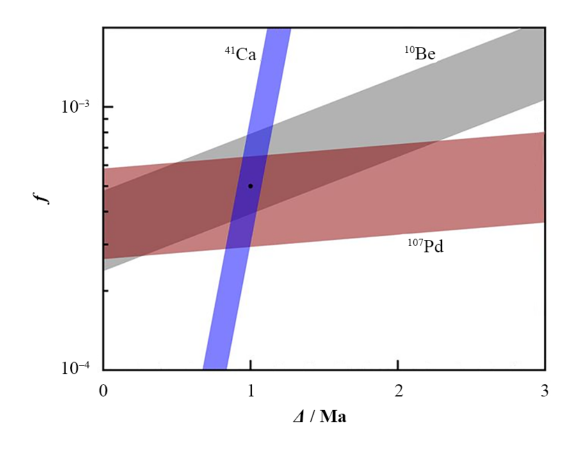


图3 太阳系形成初期放射性核素^{10}Be、^{41}Ca、^{107}Pd的演化曲线[17]
Fig.3 Evolution Curves for ^{10}Be, ^{41}Ca, ^{107}Pd in the early stages of the formation of the solar system[17]

与生命相关的物质,包括碳、氮、氧等元素,都是在恒星中合成,并通过超新星爆发被抛射出来,最终出现在地球上,成为构成我们身体的重要材料。可以说,没有超新星就不会有生命出现。最近的研究发现,人类的生存和繁衍需要20种氨基酸,身体内部只能合成其中的一半,其余的需要从食物中获得。在这些对生命至关重要的20种氨基酸中,除了甘氨酸不具有手性外,其他19种氨基酸都呈现出左手性[22]。而Miller和Urey[23]在电火花实验中制造的22种氨基酸,左手性和右手性都有,且具有大致相同的比例。既然如此,生命为什么只选择了左手性的氨基酸呢?Boyd等[24]提出的超新星中微子氨基酸处理模型认为:超新星爆发后,新产生的中子星或黑洞因坍缩而形成极其强大的磁场,当中微子流和尘埃颗粒在磁场中穿行时,与中微子反向的有机分子会被破坏,而同向的有机分子因动量守恒约束被保留下来,从而导致氨基酸的左手性选择。生命很有可能就是这样产生,并传播到银河系和整个地球的。

超新星不仅与氨基酸的手性形成有关系,对生命的演化也有重要影响。比如,近地超新星的爆发,将会消灭地球上的一些物种,同时也会为新物种的产生提供助力。美国科学家研究发现[25],4.4亿年前的奥陶纪生物大灭绝与超新星爆炸有关,并且也找到了爆炸的遗迹。人们也可以通过超新星爆发时产生的放射性核素(比如^{60}Fe[26])来研究近地超新星爆炸的历史。

4 结语

综上所述,超新星的研究对人们认识宇宙、太阳系乃至生命的诞生都具有重要的意义。作为测量宇宙距离的标准烛光,超新星可以帮助人们丈量宇宙中星系之间的距离,从而研究宇宙的组成以及宇宙的膨胀和演化规律。超新星不仅是星系化学演化的主要驱动力,还触发了太阳系的形成,孕育了宇宙中的生命。总之,超新星中包含了大量的科学秘密。对超新星的研究必定能丰富我们对宇宙的认识,破解大量的自然界未知之谜。

根据预测,银河系中每一百年会出现两次左右的超新星爆发事件。上一次近地超新星事件发生在1987年,已经过去了35年。因此,下一个能用肉眼看到的超新星的出现已为时不远了。目前,世界各国的科学家们正在为更好地研究下一个近地超新星做充分准备[27]:2021年韦伯太空望远镜发射升空,并于2022年7月正式开工拍摄到了宇宙中已知最早的星系。超级神冈的中微子探测器也准备就绪,同时还研制了一种超新星预警装置。意大利的Virgo引力波探测装置也正在设法提高干涉仪的灵敏度,以更好地测量遥远的超新星。500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope,FAST)也在搜索超新星留下来的遗迹[28],观测结果也能为未来超新星的研究作出贡献。一些业余的天文学爱好者也想利用手中不太灵敏的望远镜,通过拍摄傍晚时天空的照片,来搜寻超新星出现的痕迹。

作者贡献声明 李志宏承担了调研、计算、报告和写作等工作;其他作者参与了阅读和修改工作。

参考文献

1 Woosley S E, Heger A, Weaver T A. The evolution and explosion of massive stars[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, **74**(4): 1015 – 1071. DOI: 10.1103/revmodphys.74.1015.

chinaXiv:202309.00051v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202309.00051v1

2 Woosley S E, Blinnikov S, Heger A. Pulsational pair instability as an explanation for the most luminous supernovae[J]. Nature, 2007, **450**(7168): 390 – 392. DOI: 10.1038/nature06333.

3 Graur O. Supernova[M]. Cambridge: The MIT Press, 2022. DOI: 10.7551/mitpress/12526.001.0001.

4 Branch D, Wheeler J C. Supernova explosions[M]. Springer-Verlag GmbH Germany, 2017.

5 Hillebrandt W, Niemeyer J C. Type ia supernova explosion models[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2000, **38**: 191 – 230. DOI: 10.1146/annurev.astro.38.1.191.

6 Iben I, Tutukov A V. Supernovae of type I as end products of the evolution of binaries with components of moderate initial mass[J]. The Astrophysical Journal Letters Supplement Series, 1984, **54**: 335 – 372. DOI: 10.1086/190932.

7 Yang J, Fan X Y, Feng C J, *et al*. Latest data constraint of some parameterized dark energy models[J]. Chinese Physics Letters, 2023, **40**(1): 019801. DOI: 10.1088/0256-307x/40/1/019801.

8 Friedman A. Über die Krümmung des raumes[J]. Zeitschrift Für Physik, 1922, **10**(1): 377 – 386. DOI: 10.1007/BF01332580.

9 Li G X, Li Z H. Relation between varying fine structure constant and cosmological components[J]. Physical Review D, 2021, **103**(6): 063504. DOI: 10.1103/physrevd.103.063504.

10 Li G X, Li Z H. Effect of cosmic mean metallicity on the supernovae cosmology[J]. The Astronomical Journal, 2021, **162**(6): 249. DOI: 10.3847/1538-3881/ac2cbb.

11 Rutherford E. Origin of actinium and age of the earth[J]. Nature, 1929, **123**(3096): 313 – 314. DOI: 10.1038/123313b0.

12 Truran J W. The age of the universe from nuclear chronometers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1998, **95**(1): 18 – 21. DOI: 10.1073/pnas.95.1.18.

13 Meyer B S, Truran J W. Nucleocosmochronology[J]. Physics Reports, 2000, **333** – **334**: 1 – 11. DOI: 10.1016/S0370-1573(00)00012-0.

14 李志宏. 宇宙年龄研究的最新进展[J]. 原子能科学技术, 2019, **53**(10): 1747 – 1754. DOI: 10.7538/yzk.2019.53.10.1747.

LI Zhihong. Recent study progress in age of the universe [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, **53**(10): 1747 – 1754. DOI: 10.7538/yzk.2019.53.10.1747.

15 Cameron A G W, Truran J W. The supernova trigger for formation of the solar system[J]. Icarus, 1977, **30**(3): 447 – 461. DOI: 10.1016/0019-1035(77)90101-4.

16 Lattimer J M, Schramm D N, Grossman L. Supernovae, grains and the formation of the Solar System[J]. Nature, 1977, **269**(5624): 116 – 118. DOI: 10.1038/269116a0.

17 Banerjee P, Qian Y Z, Heger A, *et al*. Evidence from stable isotopes and ^{10}Be for solar system formation triggered by a low-mass supernova[J]. Nature Communications, 2016, **7**: 13639. DOI: 10.1038/ncomms13639.

18 Boss A P, Keiser S A. Supernova-triggered molecular cloud core collapse and the Rayleigh-Taylor fingers that polluted the solar nebula[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2012, **756**(1): L9. DOI: 10.1088/2041-8205/756/1/l9.

19 Gaidos E, Krot A N, Williams J P, *et al*. ^{26}Al and the formation of the solar system from a molecular cloud contaminated by Wolf-Rayet winds[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2009, **696**(2): 1854 – 1863. DOI: 10.1088/0004-637x/696/2/1854.

20 Li G X, Li Z H. The ^{26}Al production of the ν_e-process in the explosion of massive stars[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2022, **932**(1): 49. DOI: 10.3847/1538-4357/ac6ef8.

21 Su J, Zhang H, Li Z H, *et al*. First result from the Jinping Underground Nuclear Astrophysics experiment JUNA: precise measurement of the 92 keV ^{25}Mg(p, γ)^{26}Al resonance[J]. Science Bulletin, 2022, **67**(2): 125 – 132. DOI: 10.1016/j.scib.2021.10.018.

22 Bonner W A. Parity violation and the evolution of biomolecular homochirality[J]. Chirality, 2000, **12**(3): 114 – 126. DOI: 10.1002/(sici)1520-636x(2000)12: 3<114: aid-chir3>3.0.co;2-n.

23 Miller S L. The production of amino acids under possible primitive earth conditions[J]. Science, 1953, **117**: 528.

24 Boyd R N, Kajino T, Onaka T. Supernovae and the chirality of the amino acids[J]. Astrobiology, 2010, **10**(5): 561 – 568. DOI: 10.1089/ast.2009.0427.

25 Brakenridge G R. Solar system exposure to supernova γ radiation[J]. International Journal of Astrobiology, 2021, **20**(1): 48 – 61. DOI: 10.1017/s1473550420000348.

26 Wallner A, Feige J, Kinoshita N, *et al*. Recent near-Earth supernovae probed by global deposition of interstellar radioactive ^{60}Fe[J]. Nature, 2016, **532**(7597): 69 – 72.

ChinaXiv合作期刊

DOI: 10.1038/nature17196.
27 Castelvecchi D. How to capture an exploding star[J]. Nature, 2022, **602**: 562 – 565.
28 Gao X Y, Reich W, Sun X H, *et al*. Peering into the Milky Way by FAST: IV. identification of two new Galactic supernova remnants G203.1+6.6 and G206.7+5.9[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2022, **65** (12): 129705. DOI: 10.1007/s11433-022-2031-7.

chinaXiv:202309.00051v1